

PEMONITORAN KELIKATAN MINYAK PELINCIR DENGAN KAEDAH PANCARAN AKUSTIK: BAHAGIAN 2 – PERUBAHAN TENAGA PANCARAN AKUSTIK DARI PERUBAHAN SUHU

OTHMAN INAYATULLAH¹, NORDIN JAMALUDDIN², MOHD JAILANI MOHD NOR³ & YUSOFF ALI⁴

Abstrak. Pemonitoran kelikatan minyak pelincir dalam enjin diesel sangat penting kerana ianya berkaitan dengan kecekapan dan kemampuan enjin tersebut. Pemonitoran dengan teknik pancaran akustik merupakan satu teknik pemonitoran kelikatan minyak pelincir enjin diesel yang baru diperkenalkan. Teknik ini telah dibangunkan dalam pemonitoran kelikatan minyak pelincir gelas. Isyarat pancaran akustik dirambat dari zon pengelantaran ombok ke atas permukaan minyak pelincir dalam silinder dengan penerima berada di hujung akhir kembang ombok semasa ombok berada di pusat mati bawah. Rambatan isyarat dilakukan semasa enjin diesel beroperasi dengan penggunaan minyak pelincir sedia ada pada putaran aci engkol yang malar dan suhu yang pelbagai. Tenaga pancaran akustik merupakan parameter tumpuan di samping parameter punca min kuasa dua dan amplitud sebagai parameter tambahan. Nilai tenaga pancaran akustik akan meningkat apabila suhu minyak pelincir meningkat melalui persamaan eksponen faktor m . Hasil kajian membuktikan pemonitoran kelikatan minyak pelincir enjin diesel boleh dilakukan dengan menggunakan teknik pancaran akustik.

Kata kunci: Punca min kuasa dua; tenaga; kelikatan minyak pelincir; isyarat pancaran akustik; faktor m

Abstract. Monitoring the viscosity of lubricant in diesel engine is very important as relating with efficiency and ability of the engine. Monitoring by acoustic emission technique is a new technique to monitoring the engine diesel lubricant viscosity. This technique has been developed in monitoring the viscosity of bearing lubricant. Acoustic emission signal was propagated from the piston sliding onto the lubricant surface zone in the cylinder with the sensor located at the end of piston skirt when the piston is at bottom dead centre. Signal was propagated during the operation of engine diesel using present lubricant at a constant crank shaft rotation speed but for various temperatures. In this study, acoustic emission energy is the focus parameter, while root mean square (rms) and amplitude are addition parameters. The acoustic emission energy values increase when the lubricant temperatures increase with exponent equation factor m . The results of the study proved that the acoustic emission technique can be used to monitor engine diesel lubricant viscosity.

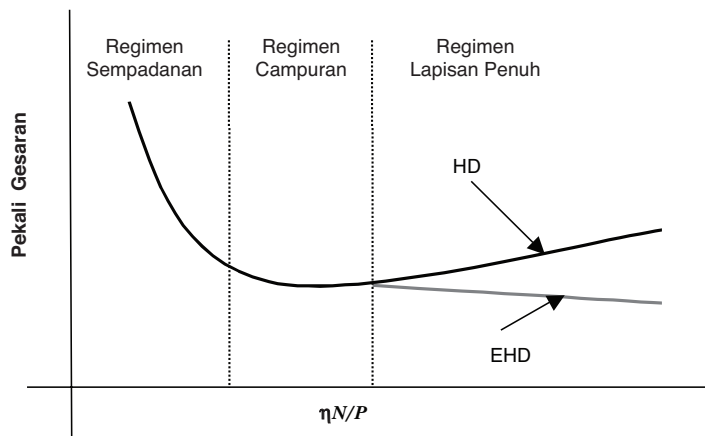
Keywords: Root mean square; energy; lubricant viscosity; acoustic emission signal; factor m

¹⁻⁴ Kumpulan Penyelidikan MEMs Automotif, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia
Tel:+603-89216015, Fax:+603-89216016. Email: othatiah@vlsi.eng.ukm.my

1.0 PENGENALAN

Gelangsar antara permukaan pepejal akan menghasilkan pekali geseran yang tinggi serta menyebabkan berlakunya kehausan dengan lebih cepat. Ini akan menyebabkan ciri komponen tersebut berubah seperti kekerasan yang rendah, tenaga permukaan yang tinggi, tindak balas haba dan tindak balas hakisan. Penggunaan minyak pelincir adalah untuk mengurangkan pekali geseran semasa aktiviti gelangsar dua permukaan. Penggunaan minyak pelincir pula bergantung kepada beberapa aspek sama ada dalam bentuk sistem bendalir atau sistem mekanik.

Pelinciran dalam sistem mekanik boleh diterjemahkan dalam 3 regimen, iaitu regimen lapisan penuh, regimen campuran dan regimen persempadanan [1]. Regimen lapisan penuh boleh dibahagikan kepada 2, iaitu sub-regimen elastik-hidrodinamik (EHD) dan hidrodinamik (HD) seperti ditunjukkan dalam Rajah 1 [2]. Sub-regimen EHD merupakan pelincir yang tidak dipengaruhi oleh perubahan tekanan tinggi semasa tindak balas antara pelinciran. Ini berbeza dengan sub-regimen HD, yang mana ianya boleh dipengaruhi oleh keadaan tindak balas pelinciran semasa tekanan rendah [3, 4]. Kebanyakan regimen minyak pelincir sistem mekanik kenderaan adalah dalam sub-regimen EHD termasuk minyak pelincir enjin yang digunakan sebagai bahan pelincir pada pemasangan omboh.



Rajah 1 Rajah regimen lapisan penuh. Kaitan antara pekali geseran dengan Nombor Sommerfeld ($\eta N/P$) pada sub-regimen hidrodinamik (HD) dan sub-regimen elastik-hidrodinamik (EHD)

Minyak pelincir diperlukan oleh enjin untuk mengurangkan kehausan pada omboh, gegelang omboh dan dinding silinder apabila omboh menggelangsar pada dinding silinder dengan halaju omboh dan tekanan

silinder berada dalam tahap tinggi [5-11]. Komponen-komponen mekanik dalam sistem pembakaran enjin diesel merupakan komponen yang mudah haus ataupun mudah mengalami kerosakan disebabkan kelemahan minyak pelincir. Ini menyebabkan kerosakan pada enjin. Kelemahan minyak pelincir boleh dikelaskan sebagai minyak pelincir lemah, cair, tercemar dan lesu. Memandangkan minyak enjin merupakan penyebab utama kerosakan enjin diesel, maka beberapa teknik telah dibangunkan untuk pemantauan sifat-sifat minyak pelincir terutama sekali kelikatannya. Teknik makmal merupakan teknik biasa digunakan untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir.

Pemilihan teknik pancaran akustik dalam kajian adalah disebabkan kemampuannya dalam pemantauan kerosakan ataupun pemantauan pencapaian operasi enjin diesel melalui beberapa kajian yang dilakukan sebelum ini [12-17]. Namun begitu kajian pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel dengan teknik pancaran akustik masih lagi dalam peringkat permulaan [18-21] dan ianya masih terhad. Tumpuan kajian sebelum ini hanya terhadap nilai kehausan [22] gegelang omboh dengan pelapik silinder enjin diesel [23] dan penghauslaturan bahan lapisan silinder [24]. Selain itu kebanyakan kajian sebelum ini hanya memberi tumpuan terhadap pengesanan kerosakan terhadap gelas anti geseran dan gelas journal serta perilaku isyarat terhadap kuantiti pelincir jenis gris dalam gelas tersebut [25] sedangkan omboh dikategorikan sebagai gelas pandu. Dengan kemampuan kesempurnaan nisbah isyarat dengan bunyi dalam julat frekuensi pancaran akustik dapat digunakan untuk membezakan data terperinci setiap aktiviti mekanik bendalir minyak pelincir seperti yang berlaku pada mekanik pepejal [26].

Frekuensi pancaran akustik yang tinggi, iaitu antara 0.1 MHz hingga 1 MHz yang digunakan dalam pemantauan keadaan enjin diesel merupakan julat frekuensi yang digunakan dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir enjin diesel. Teknik pancaran akustik mempunyai kelebihan yang lebih baik dari teknik makmal kerana pemantauan dibuat semasa enjin beroperasi serta menghasilkan keputusan ujikaji yang cepat. Ini membolehkan ramalan keadaan kelikatan minyak pelincir lebih tepat dan ianya dapat membantu dalam proses penjadualan penyelenggaraan enjin.

Dalam teknik pancaran akustik, isyarat yang terhasil berbeza apabila berlakunya perubahan kelikatan minyak pelincir. Hasil kajian ini sebenarnya meyamai dengan pemantauan kelikatan dengan teknik getaran [2]. Selain itu, parameter tenaga pancaran akustik pula akan memberikan nilai yang berbeza bergantung kepada nilai kelikatan minyak pelincir tersebut. Tenaga pancaran akustik merupakan parameter perbandingan berkait terus dengan pekali geseran seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 [2].

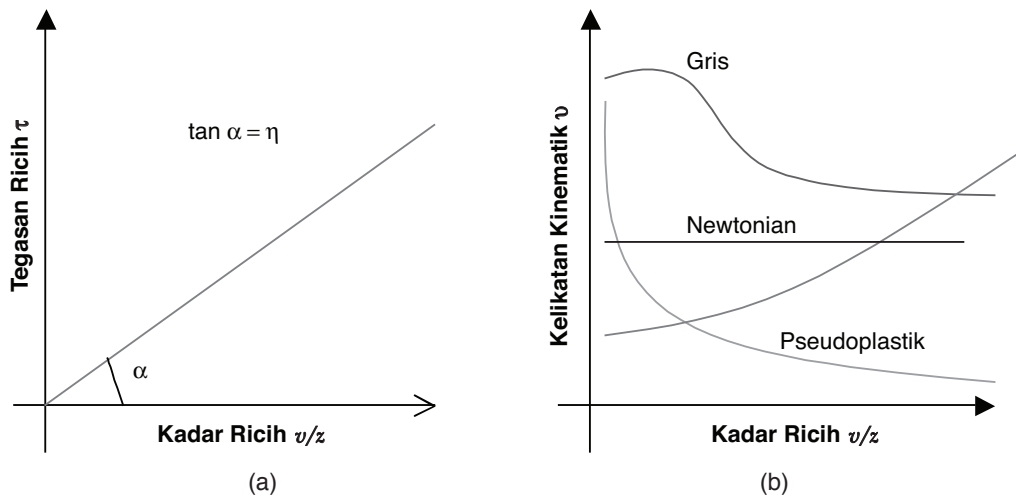
Halaju pergerakan omboh dan tekanan dalam silinder akan mempengaruhi tahap kelikatan minyak pelincir dan ini boleh ditentukan melalui tenaga

pancaran akustik yang terhasil dari rambatan isyarat. Selain itu, kesan suhu merupakan faktor utama perubahan kelikatan minyak pelincir yang disebabkan oleh julat suhu keliling yang luas [27] dan pada masa kini kebanyakan minyak pelincir mempunyai sifat elastik yang terhasil dari campuran bahan tambah dalam minyak tersebut [1].

Tumpuan kajian ini hanya terhadap kemampuan teknik pancaran akustik dalam merambat isyarat pancaran akustik pada suhu minyak pelincir yang berbeza. Cabaran kajian ini adalah melihat hubungan nilai tenaga pancaran akustik dengan nilai pekali geseran yang dipaparkan dalam Rajah 1 dalam sub-regimen EHD. Tenaga pancaran akustik akan meningkat apabila kelikatan minyak pelincir menurun merupakan jangkakan keputusan kajian ini.

2.0 KELIKATAN

Pada umumnya minyak pelincir terbahagi kepada 3 regimen seperti mana yang dinyatakan di atas. Minyak pelincir gred tunggal dikategorikan sebagai minyak pelincir Newtonian [28-29] yang mana perubahan kelikatannya dipengaruhi oleh suhu dan tekanan [30-32]. Namun begitu, minyak pelincir enjin diesel yang berasaskan minyak mentah dan bergred tunggal tidak semestinya bersifat Newtonian. Ini disebabkan oleh kehadiran bahan tambah dalam minyak pelincir tersebut [30: 33-34] seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 2.



Rajah 2 Menunjukkan (a) Minyak pelincir Newtonian (b) Minyak pelincir bukan Newtonian dengan bendalir pseudoplastik merupakan minyak pelincir berasaskan minyak mineral dan ditambah dengan polimer [34-35]

Dalam teori pelinciran, kelikatan merupakan sifat fizikal yang menakrifkan rintangan terhadap aliran. Dalam teori Newton pula, kelikatan ditakrifkan sebagai lapisan bendalir yang bergelangsar antara satu sama lain. Pengelangsaran ini mempengaruhi tegasan ricih antara lapisan permukaan bendalir. Tegasan ricih tersebut berkadar dengan kadar terikan ricih [27]. Dalam bentuk lazim tegasan ricih diberikan oleh Persamaan (1):

$$\tau = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

dengan F adalah daya dan A adalah luas kawasan yang bersentuh [31]. Selain tegasan, terikan minyak pelincir boleh ditentukan melalui Persamaan (2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\Delta z} = \frac{\Delta u \Delta t}{\Delta z} \quad (2)$$

dengan u adalah halaju, t adalah masa dan z adalah jarak [30]. Melalui Persamaan (2), kadar ricih boleh dinyatakan sebagai Persamaan (3) dengan ianya merupakan perubahan bentuk atau tegangan pada per unit masa [30] dengan mengandaikan nilai Δz dan Δt terlalu kecil.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{du}{dz} \quad (3)$$

Dengan menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (3) ianya menghasilkan Persamaan (4) [29]:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \varepsilon = \eta \frac{du}{dz} \quad (4)$$

Persamaan (4) sebenarnya merujuk kepada hukum Hooke seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 2(a). Satu hubungan lurus di antara tegasan dengan kadar ricih yang menakrifkan minyak pelincir sebagai bendalir Newtonian [36]. Selain itu dalam bendalir Newtonian, perubahan nilai kadar ricih sebenarnya tidak memberi apa-apa kesan terhadap nilai kelikatan kinematik seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(b).

Pada hakikatnya, kelikatan kinematik berubah apabila kadar ricih berubah dan ini juga akan menyebabkan kelikatan dinamik berubah melalui Persamaan (5):

$$\eta = \nu \rho \quad (5)$$

dengan ν adalah kelikatan kinematik dan ρ adalah ketumpatan bendalir. Nilai ketumpatan bendalir juga mengalami perubahan apabila suhu berubah dengan merujuk kepada Persamaan (6) [14]:

$$\rho_{t^{\circ}\text{C}} = \rho_{15^{\circ}\text{C}} - 0.00063(t^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

Kelikatan dinamik akan berubah apabila berlakunya perubahan pada suhu dan perubahan kepada tekanan. Aturan am kesan suhu terhadap kelikatan menyatakan bahawa minyak yang lebih likat akan lebih terdedah kepada perubahan. Melalui persamaan Poiseuille, variasi kelikatan dalam fungsi suhu adalah serupa dengan ketumpatan seperti mana yang dinyatakan dalam Persamaan (7):

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \alpha t + \beta t^2} \quad (7)$$

dengan η_0 adalah kelikatan mutlak pada suhu 0°C , t adalah suhu dalam darjah Celsius dan α serta β adalah pekali malar.

Persamaan Slotte (8) pula menghubungkan kelikatan dengan suhu yang menggunakan tiga pemalar, iaitu (c , a , n):

$$\eta = \frac{c}{(a + t)^n} \quad (8)$$

Hasil songsangan kelikatan ($1/\eta$) pula merupakan fungsi kepada suhu dan ianya merupakan satu variasi lurus yang hampir dengan suhu mutlak (T) [38]. Melalui Persamaan (8), telah menghasilkan taksiran fizik seperti mana yang ditunjukkan dalam Persamaan (9) [39]:

$$\eta = \frac{c_o}{V_s - V_o} \quad (9)$$

dengan, V_s adalah isipadu tertentu bendalir, V_o adalah isipadu had, $V_s - V_o$ adalah isipadu bebas dan c_o adalah pemalar yang bergantung kepada bendalir. Daripada Persamaan (9), persamaan kelikatan pada sesuatu suhu boleh dinyatakan sebagai Persamaan (10) [40]:

$$\eta_t x_t^m = \text{malar} \quad (10)$$

dengan $x_t = V_s - V_o$ dan m adalah pemalar dengan nilai 1 untuk bendalir gred tunggal dan lebih dari 1 untuk bukan bendalir multi gred.

Persamaan (11) yang menggunakan dua pemalar, iaitu A dan B merupakan kadar tindak balas kimia dengan menggunakan aktiviti tenaga [41]:

$$\eta = Ae^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (11)$$

dengan T adalah suhu mutlak. Persamaan (11) ini boleh ditulis semula dalam bentuk logaritma, iaitu Persamaan (12) dan Persamaan (13):

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T} \quad (12)$$

$$\log \eta = a + \frac{b}{T} \quad (13)$$

dengan $a = A/2.303$ dan $b = B/2.303$. A dan B merupakan pemalar tindak balas kimia yang menghasilkan aktiviti tenaga [41] seperti mana yang dinyatakan dalam Persamaan (11).

Dengan menggunakan Persamaan (8) dalam persamaan Reynolds, iaitu Persamaan (14):

$$\eta = Ae^{-\gamma t} \quad (14)$$

akan menghasilkan Persamaan (15):

$$\eta = \frac{s}{(a + t)^n} \quad (15)$$

yang mana a dan s adalah malar. Melalui Persamaan (15), telah melahirkan satu persamaan yang serupa secara logaritma seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (16) [42]:

$$\log \eta + a = \frac{c}{T + b} \quad (16)$$

dengan a , b , c adalah malar. Namun begitu, perubahan kelikatan pada suhu sebenarnya berkait dengan perubahan kelikatan kinematik (v). Ini dinyatakan oleh melalui Persamaan (17) [43]:

$$[\log(v + 0.8)]^{0.3} = A + \frac{B}{T} \quad (17)$$

Pada dewasa ini, nilai kelikatan minyak pelincir enjin diesel diperolehi secara mudah dengan menggunakan carta ASTM D 341. Persamaan ASTM adalah hasil terbitan dari Persamaan (18) [44]:

$$\log \log (v + a) = b - n \log T \quad (18)$$

dengan a adalah malar, T adalah suhu mutlak pada darjah Kelvin, b serta n adalah pekali perwatakan bendalir dan adalah $\log \log (v + a)$ dikenali sebagai fungsi Walther (W) dengan $a = 0.6$ apabila $v > 1.5 \text{ mm}^2/\text{s}$. Persamaan (18) boleh diterbitkan semula dengan menggunakan Persamaan (11) dan menghasilkan Persamaan (19):

$$v' + a' = Ae^{\left(\frac{B}{T^n}\right)} \quad (19)$$

dengan $a'/a = v'/v = A$ akhir membentuk Persamaan (20):

$$\log \log \left(\frac{v' + a'}{A} \right) = B - n \log T \quad (20)$$

Daripada Persamaan 20, persamaan ASTM boleh diterbitkan sebagai Persamaan (21):

$$\log \log Z = A - B \log T \quad (21)$$

dengan $Z = v + 0.7 + C - D + E - F + G - H$. Nilai untuk C, D, E, F, G dan H diperolehi daripada Persamaan (22) hingga Persamaan (27):

$$C = \exp(-1.14883 - 2.65868v) \quad (22)$$

$$D = \exp(-0.00381308 - 12.5645v) \quad (23)$$

$$E = \exp(5.46491 - 37.6289v) \quad (24)$$

$$F = \exp(13.0458 - 74.6851v) \quad (25)$$

$$G = \exp(37.4619 - 192.643v) \quad (26)$$

$$H = \exp(80.4945 - 400.468v) \quad (27)$$

dengan v adalah kelikatan kinematik.

Dalam penggunaan kejuruteraan, persamaan Vogel [34] merupakan persamaan yang paling tepat. Persamaan (28) tersebut ditulis sebagai:

$$\eta = k e^{b/(H-\theta)} \quad (28)$$

dengan persamaan ini merupakan bentuk hubungan yang paling tepat dengan k iaitu nilai kelikatan pada gred yang berbeza, b adalah pemalar suhu yang mana ianya meningkat dengan peningkatan kelikatan dan θ adalah suhu kelikatan tak terhingga [45].

Dengan itu, nilai pemalar n dan a pada Persamaan (15) boleh ditentukan melalui Persamaan (29) dan Persamaan (30):

$$n = (2.4 \times 10^{-3} b + 0.4) \quad (29)$$

$$a = \frac{1}{2} (\theta - 65) \quad (30)$$

Melalui Persamaan (21) dan (28), peningkatan suhu akan menyebabkan penurunan nilai kelikatan minyak pelincir. Melalui Rajah 1 pula, penurunan kelikatan akan menyebabkan peningkatan nilai pekali geseran dalam regimen EHD. Ini disebabkan berlakunya kekerapan sentuhan omboh dengan dinding silinder berlaku apabila filem minyak pelincir menipis. Peningkatan pekali geseran akan menyumbang kepada kerosakan komponen dalaman enjin. Pemonitoran kelikatan minyak pelincir adalah penting untuk mengurangkan kesan geseran dan juga boleh digunakan untuk mengurangkan pencemaran alam.

3.0 PANCARAN AKUSTIK

Pancaran akustik boleh digambarkan sebagai gelombang elastik yang terhasil semasa bahan atau komponen berada dalam tegasan. Kewujudan gelombang elastik dalam bidang permonitoran keadaan adalah disebabkan oleh pergerakan permukaan antara komponen. Pergerakan ini diukur dengan menggunakan sensor yang sensitif.

Gelombang elastik isyarat singkat terhasil disebabkan oleh pembebasan tenaga berulang-ulang dari sumber antara komponen. Secara khusus, fenomena ini sebenarnya berlaku dalam enjin diesel, iaitu semasa enjin sedang beroperasi. Komponen-komponen enjin yang bergerak akan membebaskan tenaga secara ulangan dan ianya boleh dirambat oleh sensor pancaran akustik. Isyarat pancaran akustik yang terhasil boleh diterjemahkan kepada geometri keadaan enjin tersebut [12-17].

Gelombang tegasan yang kebiasaannya dirambat dari pemonitoran keadaan bahan bercirikan isotropi, tak terhingga, homogen dan keanjalan lurus merupakan gelombang tegasan membujur dan gelombang tegasan melintang. Gelombang tegasan ini menghasilkan anjakan gelombang satah dengan vektor u merupakan perambatan serentak dengan fasa halaju gelombang tegasan c dan boleh diperolehi melalui Persamaan (31) [46]:

$$u = f(x, p - ct)d \quad (31)$$

dengan x merupakan posisi vektor dan d dengan p merupakan parameter vektor yang diperolehi dari arah pergerakan. Anjakan vektor u juga merupakan penaklukan melalui Persamaan (32) [46]:

$$\mu_L \nabla^2 u + (\lambda + \mu_L) \nabla \nabla u = \rho \ddot{u} \quad (32)$$

dengan ρ adalah ketumpatan bahan, manakala μ_L dan λ adalah pemalar anjal Lamé's yang boleh ditentukan melalui Persamaan (33) dan (34):

$$\mu_L = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (33)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (34)$$

Melalui penyelesaian Persamaan (32) fasa halaju gelombang bergantung kepada ketumpatan dan pemalar anjal Lamé's bahan tersebut. Selain itu, fasa halaju ini sebenarnya tidak bergantung kepada anjal pergerakan gelombang dalam bahan [47]. Teori ini pada asasnya digunakan dalam pemantauan dalaman. Dalam aspek pemantauan permukaan bahan, gelombang tegasan yang terhasil merupakan gelombang Rayleigh yang juga dikenali sebagai gelombang dalam separa ruang [46]. Melalui persamaan eksponen, vektor u untuk fasa halaju Rayleigh (c_R) boleh diperolehi dari Persamaan (32) dan menghasilkan Persamaan (35) [46]:

$$\left(2 - \frac{c_R^2}{c_T^2}\right)^2 - 4\left(1 - \frac{c_R^2}{c_L^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{c_R^2}{c_T^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (35)$$

dengan c_T merupakan halaju gelombang tegasan melintang, c_R merupakan halaju gelombang tegasan separa ruang dan c_L pula halaju gelombang tegasan membujur.

Dalam pengukuran sebenar menggunakan pancaran akustik, gelombang permukaan yang dirambat menyerupai gelombang tegasan Lamb, dengan fasa halaju gelombang tegasan Lamb bergantung kepada panjang gelombang dan frekuensi tidak seperti gelombang tegasan Rayleigh, gelombang tegasan membujur dan melintang. Rambatan gelombang tegasan Lamb disebabkan penyebaran muka gelombang. Penyebaran muka gelombang bermaksud fasa halaju berubah mengikut frekuensi dan ianya dikenali sebagai penyebaran halaju [48].

Pada kebiasaannya gelombang tegasan yang dirambat oleh pancaran akustik terbentuk dalam 2 keadaan, iaitu berterusan dan cetusan. Dalam

pemantauan enjin, gelombang tegasan yang terhasil adalah dalam bentuk cetusan. Halaju (c_e) gelombang tegasan untuk besi tuang adalah 0.485 cm/µsaat yang berbentuk cetusan boleh dirumuskan seperti Persamaan (36) [46] :

$$c_e = c + k_w \frac{d_c}{dk_w} \quad (36)$$

dengan d_c adalah amplitud puncak anjakan permukaan yang disebabkan oleh gelombang tegasan membujur dan k_w adalah bilangan gelombang melalui Persamaan (37):

$$kw = 2\pi / \Lambda = 2\pi f/c \quad (37)$$

dengan c adalah halaju fasa gelombang tegasan.

Berdasarkan kajian Jiaa dan Dornfeld, iaitu kajian *pin on disk* dalam sentuhan gelangar, kadar tenaga pancaran akustik yang terhasil terhadap masa semasa pengelansaran boleh ditunjukkan dalam Persamaan (38) [49]:

$$\dot{E}_f = (\tau_s A_s v_s)^m \quad (38)$$

dengan τ_s adalah kekuatan ricih, A_s pula adalah luas kawasan sentuhan sebenar, v_s pula adalah halaju gelangar dan m pula adalah pemalar yang diukur dari sistem bahan serta sensor. Nilai m boleh diandaikan sebagai 1, 2, 3, ..., n .

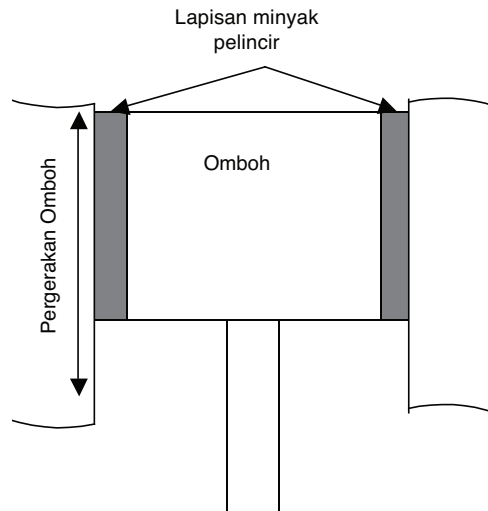
Tenaga isyarat boleh dianggarkan dari nilai min kuasa dua ke atas masa, t . Ini dinyatakan melalui Persamaan (39) [50-52]:

$$E = \int_0^t v^2 (t) dt \quad (39)$$

Untuk pemantauan kelikatan minyak pelincir, tenaga pancaran akustik dibebaskan semasa pengelansaran ombok ke atas dinding silinder dengan berlapis minyak pelincir seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Tenaga akustik yang terjana daripada tindak balas gelangar ombok semasa pergerakan ombok boleh digunakan sebagai petunjuk geometri minyak enjin tersebut. Secara teori tenaga pancaran akustik dalam pemantauan kelikatan minyak pelincir boleh dinyatakan melalui Persamaan (40):

$$E_t = E_o e^{k_e \Delta t} \quad (40)$$

dengan E_t adalah tenaga pancaran akustik pada suhu t , k_e adalah faktor pembesaran tenaga pancaran akustik pada suhu yang malar dan Δt adalah perubahan suhu, iaitu $(t - 40^\circ\text{C})$. Pemilihan suhu 40°C sebagai suhu asas berasaskan piawaian suhu pengukuran kelikatan kinematik minyak pelincir.



Rajah 3 Pengelansaran omboh dalam atas permukaan minyak pelincir semasa pergerakan omboh yang menjana tenaga pancaran akustik

4.0 KAEDAH KAJIAN

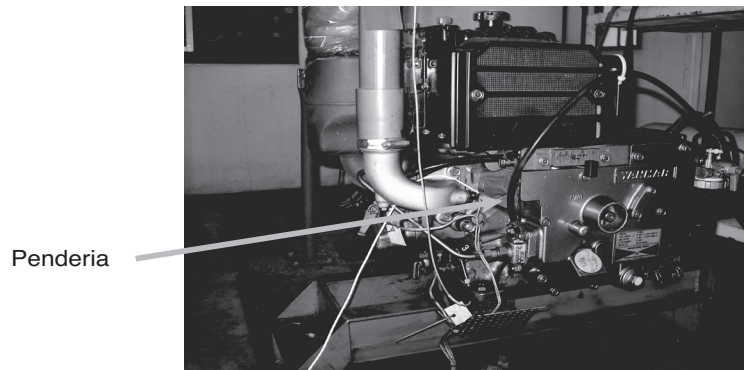
Kajian ini menggunakan enjin diesel 1 silinder, 4 lejang dengan diameter silinder 85 mm dan jarak lejang 87 mm melintang sebagai peralatan kajian. Enjin berada dalam atas rig *dynamometer*. Sensor yang digunakan adalah dari jenis PAC WD dengan julat suhu pengoperasian antara -65°C hingga 177°C . Julat operasi frekuensi pula antara 100 kHz hingga 1000 kHz dan frekuensi salunan sebanyak 125 kHz. Penggunaan prapenguat PAC 1220A dengan gandaan 40 dB adalah bertujuan meningkatkan isyarat aras rendah kepada aras talian. Isyarat yang terhasil akan dirakam dan diperlihatkan melalui peralatan AE jenis PAC DiSP dengan perisian *AEwinTM ver 1.30*.

Kedudukan sensor adalah dalam penghujung bawah kambi semasa omboh berada dalam pusat mati bawah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4. Sampel kajian adalah minyak pelincir gred SAE 40. Tahap kuantiti dalam takungan minyak pelincir baru adalah penuh. Pemilihan tahap kuantiti

penuh kerana pengurangan kuantiti minyak akan mempengaruhi hasil kajian dan ini telah dibuktikan melalui kajian Douglas [23]. Data terperinci sampel kajian seperti mana ditunjukkan dalam Jadual 1.

Jadual 1 Ciri sampel kajian

Ciri	Parameter
Ketumpatan pada suhu 15°C	0.8971 kg/l
Takat Mengalir	-6°C
Takat Kilat	256°C
Kelikatan Kinematik	
40°C	160.8 cSt
100°C	15.2 cSt



Rajah 4 Kedudukan penderia semasa ujikaji

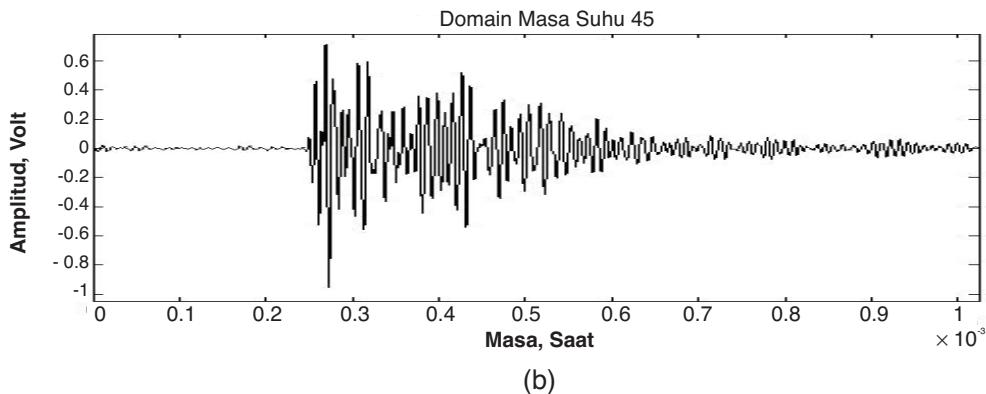
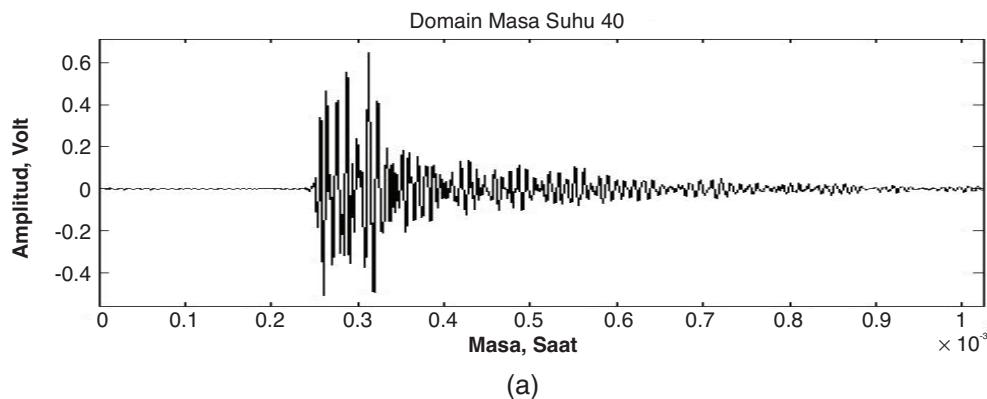
Dalam kajian ini, ujikaji dilakukan dengan mengawal suhu dan halaju putaran enjin. Kawalan suhu dan halaju putaran adalah melalui rig *dynamometer*. Halaju putaran enjin adalah pada 1000 ppm. Ujikaji dilaksanakan dengan kawalan suhu dengan bacaan diambil pada suhu 40°C, 45°C, 50°C dan 55°C. Selain itu, kajian kelikatan secara makmal dilakukan ke atas sampel untuk mengetahui nilai kelikatannya pada suhu 40°C, 45°C, 50°C dan 55°C. Terdapat 3 sampel untuk kajian ini yang bertujuan pengukuhan keputusan kajian yang dikenali sebagai sampel A, sampel B dan sampel C. Sampel A merupakan minyak pelincir yang telah digunakan selama 10 jam. Sampel B pula merupakan minyak pelincir yang telah digunakan selama 40 jam dan sampel C pula merupakan minyak pelincir yang telah digunakan selama 60 jam.

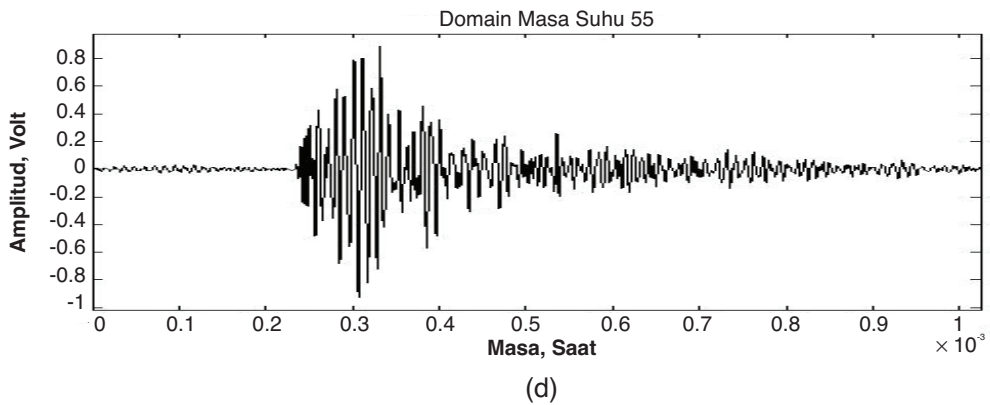
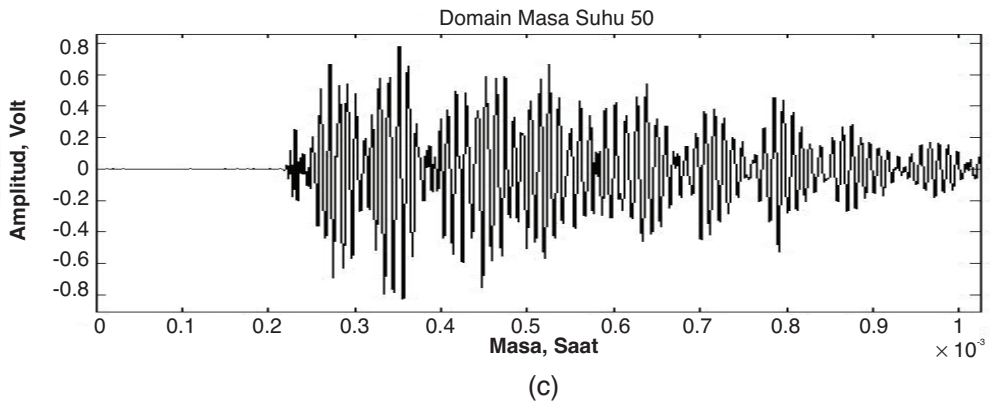
Enjin diesel yang digunakan untuk kajian ini merupakan enjin yang menggunakan kaedah semburan minyak pelincir. Iaitu dengan menggunakan pam untuk penghantaran minyak pelincir ke kepala silinder, gegelang omboh dan dinding silinder. Semburan minyak pelincir terhadap dinding silinder adalah melalui lubang yang terdapat pada rod penyambung.

5.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

5.1 Keputusan

Isyarat domain masa bagi setiap suhu untuk sampel A ditunjukkan dalam Rajah 5. Isyarat domain masa tersebut dianalisis untuk mendapatkan nilai parameter amplitud, punca min kuasa dua (pmkd) dan tenaga. Hasil analisis isyarat domain masa dan nilai kelikatan untuk setiap sampel pada setiap suhu kajian pada kelajuan enjin 1000 ppm ditunjukkan dalam Jadual 2 hingga Jadual 5.





Rajah 5 Isyarat pancaran akustik yang dirambat dari setiap suhu ujikaji yang berbeza dari sampel A

Jadual 2 Nilai purata punca min kuasa dua (pmkd) (volt) pada setiap sampel kajian

	Suhu Minyak Pelincir			
	40°C	45°C	50°C	55°C
Sampel A	0.1145	0.1229	0.1315	0.1477
Sampel B	0.0835	0.1054	0.1096	0.1287
Sampel C	0.0814	0.1026	0.1089	0.1194

Jadual 3 Nilai purata amplitud (volt) pada setiap sampel kajian

	Suhu Minyak Pelincir			
	40°C	45°C	50°C	55°C
Sampel A	0.6243	0.6513	0.8209	0.8512
Sampel B	0.5854	0.6442	0.7268	0.7394
Sampel C	0.5322	0.6436	0.6836	0.7294

Jadual 4 Nilai purata tenaga pancaran akustik (Joule) pada setiap sampel kajian

	Suhu Minyak Pelincir			
	40°C	45°C	50°C	55°C
Sampel A	0.3509	0.3576	0.3602	0.3632
Sampel B	0.3448	0.3547	0.3623	0.3668
Sampel C	0.3397	0.3480	0.3483	0.3513

Jadual 5 Nilai kelikatan (Pa.s) pada setiap sampel kajian

	Suhu Minyak Pelincir			
	40°C	45°C	50°C	55°C
Sampel A	0.1296	0.0948	0.0753	0.0592
Sampel B	0.1184	0.0873	0.0657	0.0519
Sampel C	0.1156	0.0859	0.0666	0.0516

5.2 Analisis Matematik

Hasil analisis matematik melalui Persamaan (40), dengan nilai faktor k_e bernilai 0.0035. Nilai faktor k_e merupakan nilai dari hasil kajian kelikatan rheologi.

Jadual 6 Keputusan analisis matematik ke atas parameter tenaga (Joule)

	Suhu Minyak Pelincir			
	40°C	45°C	50°C	55°C
Sampel A	0.3509	0.3571	0.3634	0.3698
Sampel B	0.3448	0.3509	0.3571	0.3634
Sampel C	0.3397	0.3457	0.3518	0.3580

5.3 Perbincangan

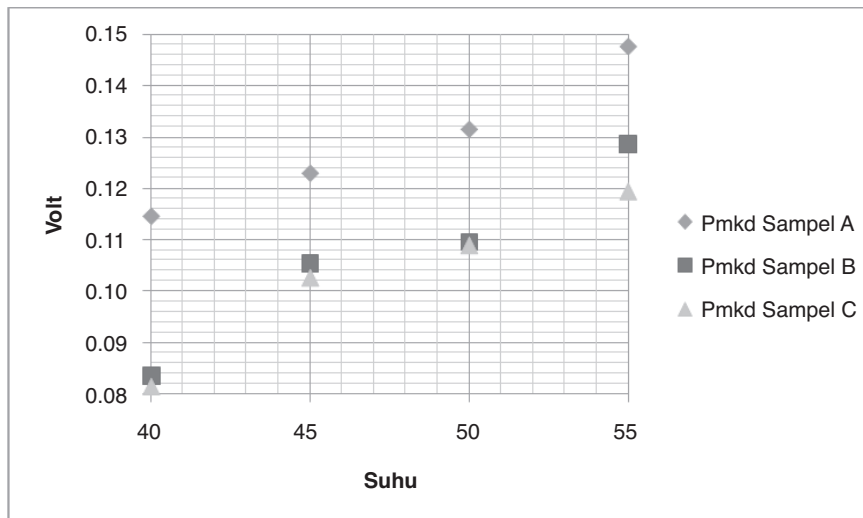
Seperti yang dijangkakan perubahan kelikatan minyak pelincir akan memberi kesan kepada parameter isyarat domain masa pancaran akustik. Peningkatan suhu akan menyebabkan kelikatan minyak pelincir menurun dan pada masa yang sama tenaga pancaran akustik pula meningkat seperti mana yang ditunjukkan dalam Jadual 4 dan Jadual 5. Keadaan ini berlaku pada kesemua sampel kajian. Peningkatan tenaga pancaran akustik adalah disebabkan oleh peningkatan pekali geseran. Peningkatan pekali geseran pula adalah disebabkan penurunan kelikatan minyak pelincir semasa peningkatan suhu seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Keadaan ini berlaku pada minyak pelincir sub-regimen EHD.

Jika dilihat pada perbandingan parameter tenaga pancaran akustik antara hasil analisis matematik dengan hasil dari domain masa, perbezaan nilai adalah ditunjukkan dalam Jadual 7. Nilai tenaga pada suhu 40°C untuk semua sampel merupakan nilai tenaga rujukan untuk pengiraan dalam analisis matematik.

Jadual 7 Perbezaan nilai tenaga pancaran akustik melalui analisis domain masa dengan analisis matematik

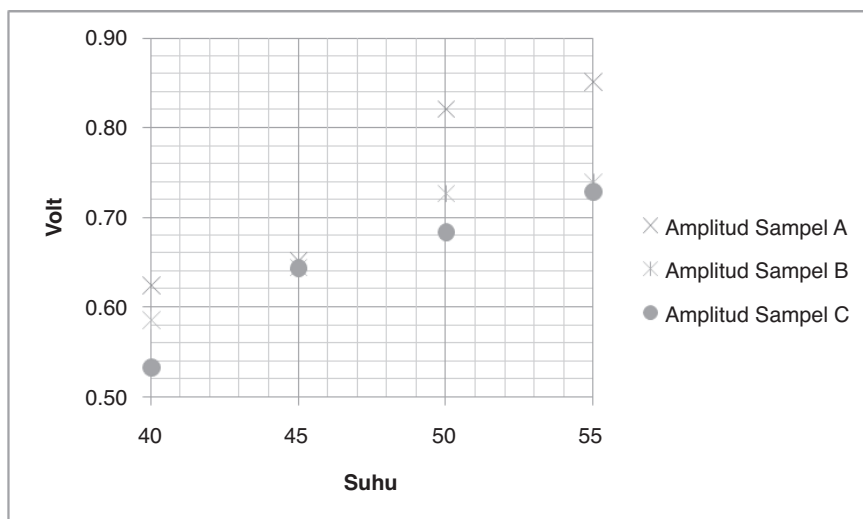
Suhu		Sampel Kajian		
		A	B	C
45°C	Domain Masa	0.3579	0.3547	0.348
	Matematik	0.3571	0.3509	0.3457
	% Beza	-0.22	-1.07	-0.66
50°C	Domain Masa	0.3602	0.3623	0.3483
	Matematik	0.3634	0.3571	0.3518
	% Beza	0.89	-1.44	1.00
55°C	Domain Masa	0.3632	0.3666	0.3513
	Matematik	0.3698	0.3634	0.358
	% Beza	1.82	-0.87	1.91

Melalui Jadual 7, peratus perbezaan antara analisis domain masa dengan analisis matematik tidak terlalu besar. Peratus perbezaan yang terbesar adalah 1.91% dan yang terendah adalah 0.22%. Penanda (-) adalah menunjukkan bahawa nilai tenaga pancaran akustik analisis matematik lebih rendah dari nilai tenaga pancaran akustik analisis domain masa.



Rajah 6 Nilai punca min kuasa dua pada setiap sampel

Selain parameter tenaga pancaran akustik, peningkatan suhu juga melibatkan peningkatan nilai amplitud dan punca min kuasa dua seperti mana yang ditunjukkan dalam Rajah 6 dan Rajah 7. Peningkatan ini adalah selari dengan peningkatan tenaga pancaran akustik.



Rajah 7 Nilai amplitud pada setiap sampel

6.0 KESIMPULAN

Merujuk kepada keputusan kajian, teknik pancaran akustik boleh digunakan dalam menentukan tahap kelikatan minyak pelincir. Kaedah ini sebenarnya lebih efektif dari kaedah terdahulu seperti kajian makmal. Efektif yang dimaksudkan ialah ianya lebih mudah, cepat dan boleh dilakukan semasa enjin beroperasi. Berbanding dengan kaedah getaran pula, teknik pancaran akustik menghasilkan isyarat yang lebih tulen. Ini disebabkan isyarat yang dirambat hanya menumpukan kepada tindak balas kelikatan sahaja. Manakala rambatan isyarat getaran akan merangkumi isyarat getaran komponen dalaman dan luaran enjin dan tapisan isyarat terpaksa dilakukan untuk memperolehi isyarat tulen. Selain itu, dengan menggunakan faktor m dan Persamaan (40), membolehkan jangkaan hayat minyak pelincir dilakukan secara matematik dan ketentuan nilai kawalan kelesuan boleh diterbitkan. Hasilnya, kajian ini telah membuktikan peningkatan tenaga berlaku semasa kelikatan minyak enjin menurun yang disebabkan oleh peningkatan suhu minyak pelincir. Ini menyebabkan peningkatan pekali geseran seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Untuk kajian ketentuan nilai kawalan, kajian perilaku kelikatan minyak pelincir adalah amat penting.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Universiti Malaysia Perlis dan Kementerian Pengajian Tinggi yang menaja pengajian peringkat PhD.

RUJUKAN

- [1] Pirro, D. M. dan A. A. Wessol. 2001. *Lubrication Fundamentals*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [2] Serrato, R., M. M. Maru dan L. R. Padovese. 2007. Effect of Lubricant Viscosity Grade on Mechanical Vibration of Roller Bearings. *Tribology International*. 40: 1270-1275.
- [3] Hutchings, I. M. 1992. *Tribology-Friction and Wear of Engineering Materials*. Cambridge: BLC Publication.
- [4] Svahn, F. 2004. *Tribology of Carbon Based Coatings for Machine Element Application*. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis.
- [5] Imai, M., H. Teramoto, Y. Shimauchi dan E. Tonegawa. 1986. Effect Oil Supply on Fretting Wear. *Wear*. 110: 217-225.
- [6] Sato, J., M. Shima, T. Sugawara dan A. Tahara. 1988. Effects of Lubricants on Fretting Wear of Steel. *Wear*. 125: 83-95.
- [7] Shima, M., J. Sati, dan T. Sugawara. 1988. A Study of Fretting Wear: Part 5, Effect of Lubricating Oil with MoS₂ Powder. *Journal of Japan Society of Lubrication Engineers*. 33(9): 685-692.
- [8] Neyman, A. 1992. The Influence of Oil Properties on the Fretting Wear of Mild Steel. *Wear*. 152(1): 171-181.
- [9] Qiu, Y. dan B. J. Roylance. 1992. The Effect the Lubricant Additives on Fretting Wear. *Lubrication Engineering* 48(10): 801-808.

- [10] McColl, I. R., R. B. Waterhouse, S. J. Harris dan M. Tsujikawa. 1995. Lubricated Fretting Wear of a High-Strength Eutectoid Steel Rope Wear. *Wear*. 185(1-2): 203-212.
- [11] Lian, Y. F., L. G. Yu dan Q. J. Xue. 1996. The Anti Wear and Extreme-Pressure Properties of some Oil-Water Double Soluble Rare-Earth Complexes and their Tribological Behaviour in Liquid Paraffin. *Wear*. 196(1-2): 193-196.
- [12] Fog, T. L., E. R. Brown, H. S. Hansen, L. B. Madsen, P. S. Rensen, J. A. Steel, R. L. Reuben dan P. S. Pedersen. 1998. Exhaust Valve Leakage Detection in Large Engine Diesel. *Proceedings of the 11th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADAM*. 1: 269-278.
- [13] El-Ghamry, M. H., E. Brown, I. G. Ferguson, J. D. Gill, R. L. Reuben, J. A. Steel, M. Scaife, dan S. Middleton. 1998. Gaseous Air-Fuel Quality Identification for a Spark Ignition Gas Engine Using Acoustic Emission Analysis. *Proceedings of COMADEM*. 235-244.
- [14] Friss-Hausen, A. dan T. L. Fog. 2001. Monitoring Exhaust Valve Leaks and Misfire in Marine Diesel Engines. *Proceedings of COMADEM*. 641-648.
- [15] El-Ghamry, M. H., R. L. Reuben dan J. A. Steel. 2003. The Development of Automated Pattern Recognition and Statistical Feature Isolation Techniques for the Diagnosis of Reciprocating Machinery Faults Using Acoustic Emission. *Mechanical Systems and Signal Processing Journal*. 17: 805-823.
- [16] Steel, J. A. dan R. L. Reuben. 2005. Recent Development in Monitoring of Engines Using Acoustic Emission. *Journal of Strain Analysis For Engineering Design*. 40: 45-57.
- [17] El-Ghamry, M. H., R. L. Reuben, J. A. Steel dan T. L. Fog. 2005. Indirect Measurement of Cylinder Pressure from Diesel Engines Using Acoustic Emission. *Mechanical System & Signal Processing*. 19 (4): 751-765.
- [18] Othman Inayatullah. 2003. *Pembangunan Teknologi Pemantauan Keadaan Enjin Diesel Kenderaan Berperisai*. Projek Sarjana Kejuruteraan. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- [19] Othman Inayatullah. 2004. *Pembangunan Teknologi Dalam Pemantauan Keadaan Enjin-Kaedah Pancaran Akustik*. *Sorotan Darat*. 44: 61-73.
- [20] Othman Inayatullah, Mohd Jailani Mohd Nor dan Nordin Jamaluddin. 2007. Pemantauan Perubahan Kelikatan Minyak Pelincir Enjin Diesel Melalui Teknik Pancaran Akustik Dengan Kaedah Tidak Terus. *Prosiding Seminar Penyelidikan Siswazah*. 294-298.
- [21] Jamaluddin, N., M. J. Mohd Nor, O. Inayatullah dan B. I. Suraya Murat. 2007. Application of Acoustic Emission Technology to Monitoring the Lubrication Condition of a Diesel Engine of an Armored Fire Supporting Vehicle. *Proc. of the 6th Int. Conference on Acoustic Emission*. Nevada: 115-119.
- [22] Haq, A. N. dan T. Tamizharasan. 2007. **Ring Wear Monitoring in IC Engines: an Acoustic Emission Approach**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 31: 1148-1155.
- [23] Douglas, R. M., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2006. A Study of the Tribological Behaviour of Piston Ring/Cylinder Liner Interaction in Diesel Engines Using Acoustic Emission. *Tribology International Journal*. 39: 1634-1642.
- [24] Shuster, M., D. Combs, K. Karpip dan D. Burke. 2000. Piston Ring Cylinder Liner Scuffing Phenomenon Studies Using Acoustic Emission Technique. *SAE Technical Paper*. 2000-01-1782.
- [25] Mba, D. dan R. B. K. N. Rao. 2006. Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines: Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures. *The Shock and Vibration Digest*. 38(1): 3-16.
- [26] Reuben, R. L. 1998. The Role of Acoustic Emission in Industrial Condition Monitoring. *International Journal of COMADEM*. 1. 35-46.
- [27] Mohd. Zubil Bahak. 1997. *Pengenalan Tribologi*. Johor: UTM.
- [28] Crouse, W. H. dan D. L. Anglin. 1993. *Automotive Mechanics*. 10thed. Singapore: McGraw Hill.

- [29] Stone, R. dan J. K. Ball. 2004. *Automotive Engineering Fundamentals*. USA: SAE.
- [30] Briant, J., J. Denis, dan C. Parc. 1989. *Rheological Properties of Lubricants*. France: Imprimerie Barneoud.
- [31] Bhushan, B. 2002. *Introduction to Tribology*. USA: John Wiley & Sons Inc.
- [32] Hamrock, B. J., S. R. Schmid dan B. O. Jacobson. 2004. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker.
- [33] Karacan, O., M. V. Kok dan U. Karaaslan. 1999. Dependence of Thermal Stability of an Lubricating Oil on Usage period. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 55: 109-114.
- [34] Stachowiak, W. G. dan W. A. Batchelor. 2005. *Engineering Tribology*. 3ed. USA: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [35] Palacois, J. dan M. Palacois. 1984. Rheological Properties of Grease in EHD Contacts. *Tribology International*. 17(3): 167:171.
- [36] Yahaya Ramli. 1994. *Teori Pelinciran Asas*. Skudai: Universiti Teknologi Malaysia.
- [37] Ugural, A. C. 2003. *Mechanical Design an Integrated Approach*. Singapore: McGraw Hill Higher Education.
- [38] Bingham, E. C. 1922. *Fluidity and Plasticity*. New York & London: McGraw-Hill.
- [39] Batschinski, A. 1913. Inner Friction of Liquids. *Zt. Phys. Ch.* 84: 643
- [40] Tcherkezoff, N. 1962. Inside From Modern Theory About Viscosity of the Liquid. *Rev. Inst. Franc. du Petrole*. 17: 1036-1054.
- [41] Andrade, E. N. 1930. The Viscosity of Liquids. *Nature*. 125: 309.
- [42] Hugel, G. dan L. Clairbois. 1939. Study a View About the Research of One System of Absolute Viscosity to Indication of the Viscosity. *Ann. Off. Nat. Comb. Liq.* 14(1): 235-252.
- [43] Groff, J. 1961. *ABC Lubrication*. Paris: Editions Technip.
- [44] Walther, C. 1933. The Variation of Viscosity with Temperature. *World Petr. Congress*. 2: 419.
- [45] Crouch, R. F. Dan A. Cameron. 1961. Viscosity-Temperature Equations for Lubricants. *Journal of the Institute of Petroleum*. 47: 307-313.
- [46] Achenbach, J. D. 1973. *Wave Propagation in Elastic Solids*. Holland: North-Holland Publishing Company.
- [47] Beattie, A. G. 1983. Acoustic Emission Principles and Instrumentation. *Journal of Acoustic Emission*. 2: 95-123.
- [48] Pollock, A. A. 1986. Classical Wave Theory in Practical AE Testing. *Proc. JAP Society of Non-Destructive Testing*. 708-721.
- [49] Jiaa, C. L. dan D. A. Dornfeld. 1990. Experimental Studies of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis. *Wear*. 139. 403-424.
- [50] Nivesrangsan, P., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2005. AE Mapping of Engine for Spatially Located Time Series. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 19: 1034-1054.
- [51] Nivesrangsan, P., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2007. Acoustic Emission Mapping of Diesel Engines for Spatially Located Time Series-Part II: Spatial Reconstitution. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 21: 1084-1102.
- [52] Nivesrangsan, P., J. A. Steel dan R. L. Reuben. 2007. Source Location of Acoustic Emission in Diesel Engine. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 21: 1103-1114.